実験トランジスタ・アンプ設計講座

黒田 徹

●実用技術編

第10章　回路シミュレータ SPICE 入門（18）

スワーツェルの加算増幅器を改良する

前回ご紹介したスワーツェルの加算増幅器のクローズド・ループ・カットオフ周波数は約2 kHz（5月号第15図参照）ですが，位相補償回路を5月号第16図のように変更すると，カットオフ周波数は200 kHzになりました（5月号第17図参照）．

位相補償の方法を**第1図**のように変えると，クローズド・ループ・カットオフ周波数はさらに上昇し，約2 MHzになります（**第2図**参照）．

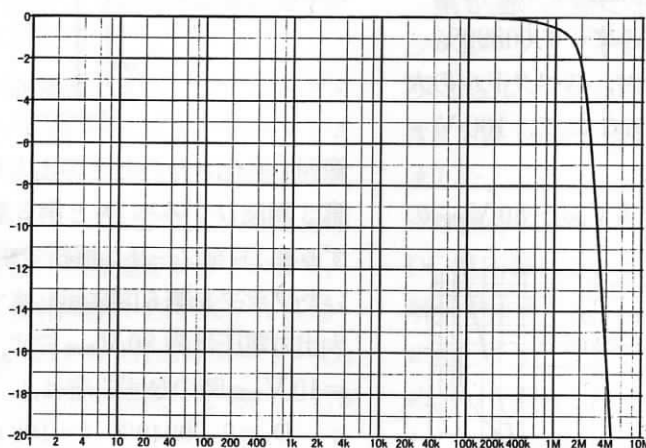
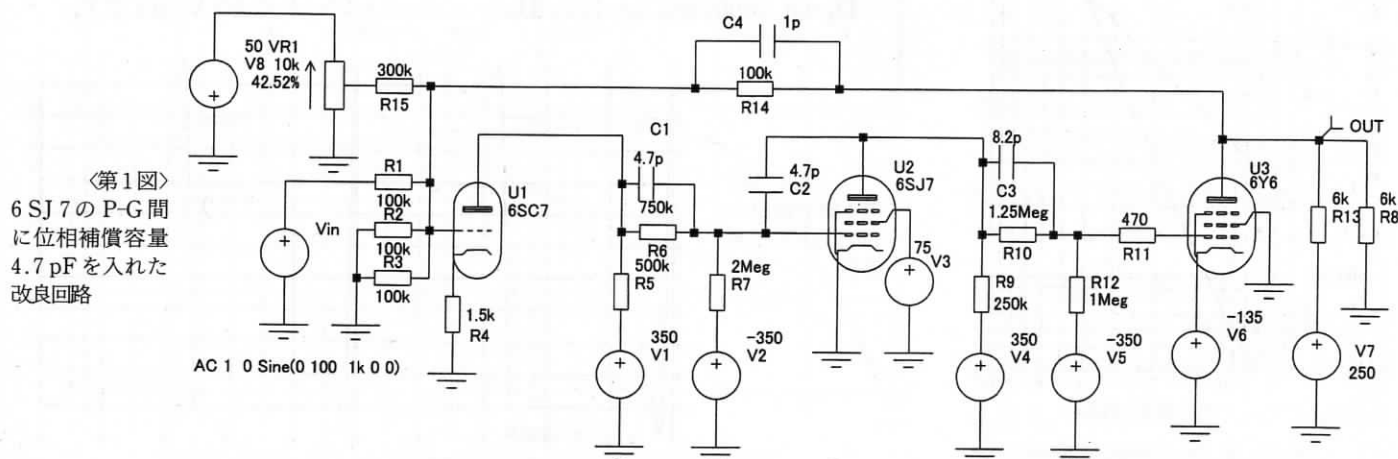
(1)　ひずみ率特性

第1図の回路の調波ひずみ率をシミュレーションしましょう．まずV_{in}＝1 kHz/100 Vの正弦波を与え過渡解析します．正確を期すには，解析終了時間を十分長く，一方タイム・ステップは十分短くする必要があります．具体的な手順を以下に示します．

① 回路図エディタのメニューから［Simulator］→［Choose Analysis］を選択し，開いたダイアログボックスを**第3図**のように編集します．すなわち，

Stop time：100 ms
.PRINT step：1 u
Output　at .PRINT step

とします．右端のTransientのチェックを忘れぬよう注意します．

② ダイアログボックスのRunボタンをクリックし，解析をスタートさせます．解析が終りグラフが表示されたならば，グラフ・ウィンドウのメニューから［Measure］→［B

〈第2図〉第1図の回路の周波数特性

〈第1図〉6 SJ 7のP-G間に位相補償容量4.7 pFを入れた改良回路

〈第8図〉
GAP/R社のオペアンプ・ユニットK2-Wのオープン・ループ・ゲインをシミュレーションする回路．出力からU1グリッドへ帰る回路がシミュレーションのために付加した回路．
原回路は，U1のグリッドが反転入力，U2のグリッドが正相入力，U4のV1がネオン管2本直列となっている

GAP/R社のK2-W

真空管式オペアンプは第2次世界大戦中と戦後の10年間に大きく発展します．G. A. Philbrickがみずからの名を冠し1946年に創立したGAP/R社は，1953年に世界初のプラグイン式オペアンプK2-Wを発売しました．K2-Wは，真空管のようにオクタル・ソケットに差し込むユニット・アンプで，電源部は含まれていません．電源供給電圧は±300 Vです(1)．

(1) K2-Wの回路構成

K2-Wの原回路を第8図に示します(2)．12 AX 7 Aを2本使っています．初段はシングル・エンド出力の差動増幅，2段目はカソード接地，出力段はカソード・フォロワです．今日の半導体オペアンプも同様の基本構成を継承しており，K2-Wの先進性に驚かされます．

① **レベル・シフト回路**：初段→2段目のレベル・シフトはR_3とR_4の分圧回路で構成される従来方式です．2段目→出力段のレベル・シフトはネオン・ランプNE-2を2個使っています．ネオン・ランプは定電圧ダイオードのように働きます．NE-2にDC電圧を印加したときのブレークダウン電圧はおそらく80 Vぐらいで，2個直列の電圧降下は160 Vぐらいでしょう．

② **正帰還**：オープン・ループ・ゲインを増やすため，12 AX 7 A (U_4) のカソードから12 AX 7 A (U_3)のカソードに，R_7とR_5と分圧回路を経て正帰還をかけています．

③ **位相補償**：12 AX 7 A (U_3) のC_{pg}，およびU_4のカソード～U_3のグリッド間に接続したC_1（＝7.5 pF）が位相補償容量になります．この位相補償法も半導体オペアンプに継承されています．

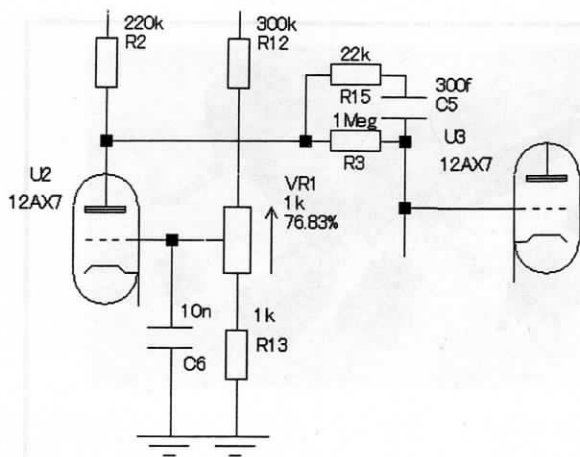
(2) オープン・ループ・ゲインのシミュレーション

第8図の回路でK2-Wのオープン・ループ・ゲインのボーデ線図をシミュレーションできます．12 AX 7はKoren氏のモデルを用いました．

2個のネオン・ランプは160 VのDC電圧源に置き換えました．AC解析で求めたボーデ線図を第10図に示します．正帰還の効果を見るため，R_7を開放し正帰還をキャンセルしたときの特性も，同時にシミュレーションしています．

第9図からすぐわかるように，正帰還をはずしたときのオープン・ループ・ゲインは60 dBですが，R_7＝221 kΩで正帰還をかけると，オープン・ループ・ゲインは83.7 dB (15,300倍) に増大します．

スワーツェルの反転増幅器に見られた位相周波数特性のリプルは完全に消え，今日のオペアンプと同相の位相特性曲線になっています．

〈第9図〉K2-Wオペアンプのオープン・ループ・ゲインのボーデ線図

〈第15図〉R_3と並列にR_{15}とC_5をつなぐ

〈第18図〉C_5の値を0と0.3 pFに切り換えたときのループ・ゲインのボーデ線図

〈第16図〉第15図の補償をしたときの10 kHz方形波応答

量が200 pF以下ならばピークはありません．

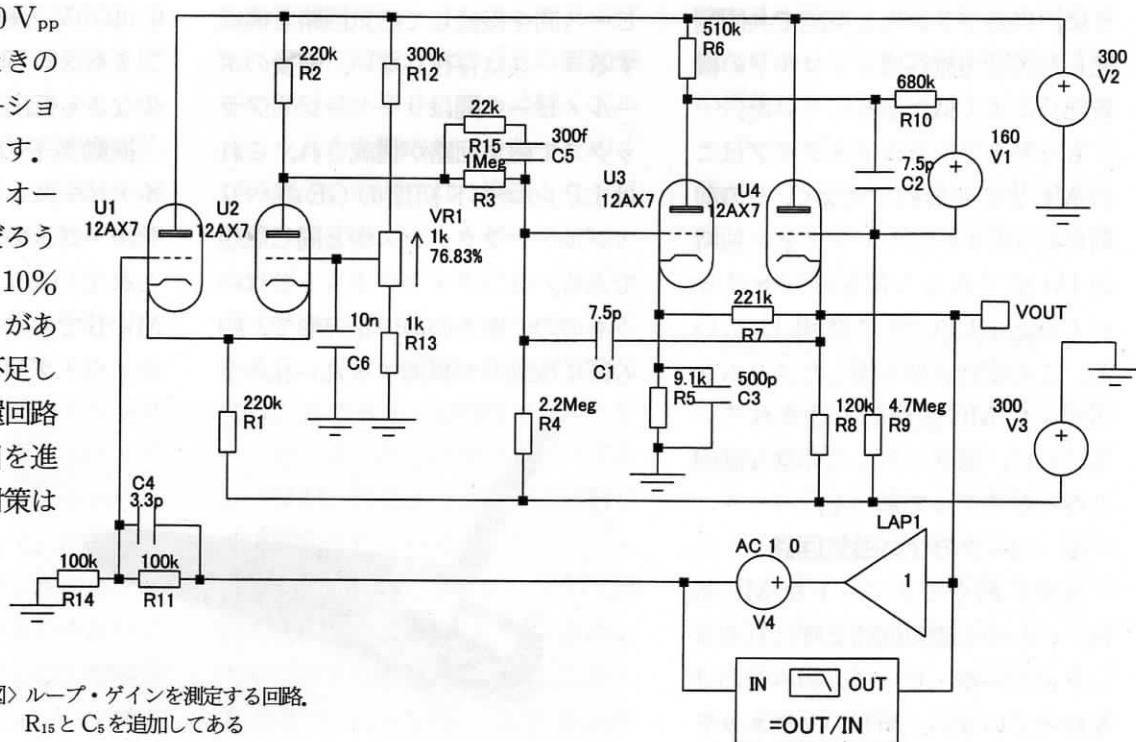
② **方形波応答**：**第11図**の反転増幅器に10 kHz/10 V_{pp}の方形波を入力したときの出力電圧のシミュレーションを**第14図**に示します．負荷容量は0なので，オーバシュートは出ないだろうと予想したのですが，10%ほどのオーバシュートがあります．位相余裕が不足している証拠です．帰還回路にはC_4を挿入し位相を進めているので，残る対策は**第10図**のR_3と並列にCを接続することぐらいです．

0〜1 pFのCをR_3と並列につなぎ応答をシミュレーションすると，**第15図**のようにR_3と並列に(C_5=0.3 pF+R_{15}=22 kΩ)をつなぐと最良の方形波応答(**第16図**)が得られました．

念のため**第17図**の回路でループ・ゲインをシミュレーションしたところ，**第18図**のボーデ線図が得られました．C_5=0の場合の位相余裕は53度ですが，C_5=0.3 pFの場合の位相余裕は83度です．

◆引用文献

(1) アナログ・デバイセズ著 電子回路技術研究会 訳「OPアンプの歴史と回路技術の基礎知識」p. 35，CQ出版㈱，2003年12月．

(2) K2-Wデータシート(http://www.national.com/rap/images/BBB2.jpg)

〈第17図〉ループ・ゲインを測定する回路．R_{15}とC_5を追加してある